

IPCF Rapporto interno n. 1/012006

Ottiche a policapillari per sorgenti X da plasmi-laser.

Tadzio Levato, Antonio Giulietti, Danilo Giulietti, Leonida A. Gizzi, Luca Labate.

Laboratorio per l'Irraggiamento con Laser Intensi (I.L.I.L.)
Istituto per i Processi Chimico-Fisici (I.P.C.F.)
Area della Ricerca C.N.R., Via Moruzzi 1, 56124 Pisa (Italy) - <http://ilil.ipcf.cnr.it/>

e-mail: tadzio.levato@ipcf.cnr.it

Abstract: Questo rapporto descrive l'attività di laboratorio del gruppo ILIL per lo studio e l'utilizzo di "Ottiche a policapillari per sorgenti X da plasmi-laser". L'obiettivo di questa attività consiste principalmente nel verificare la possibilità di collimazione e/o focalizzazione, tramite Ottiche a Policapillari (O.P.), di impulsi X di breve durata (fs) generati da plasmi-laser (PLX). In particolare descriviamo: il principio di funzionamento della O.P. con il relativo metodo di allineamento comunemente impiegato per queste componenti (basato su una sorgente X continua), le sorgenti X da Plasmi-Laser, le difficoltà legate all'allineamento delle O.P. su una sorgente X impulsata. Viene infine proposto un possibile metodo di risoluzione.

Introduzione.

Una vasta gamma di applicazioni della radiazione X fa uso di dispositivi per il controllo della radiazione X finalizzati alla concentrazione del flusso di radiazione sul campione o sul rivelatore. Tra i possibili approcci per la realizzazione di concentratori di radiazione X ricordiamo quelli basati sulla riflessione ad incidenza radente, quelli che sfruttano la diffrazione tipo Bragg o quella tipo Laue e quelli che impiegano ottiche multi-strato. Le ottiche a policapillari si basano sul principio della riflessione totale. Esse sono costituite da un insieme, da mille a milioni, di singoli capillari “impacchettati” in un unico blocco. La geometria dell’intero blocco è studiata in base alla funzione che deve svolgere, collimazione o focalizzazione. Un mono-capillare è un cilindro molto sottile, cavo al suo interno, di materiale plastico o vetroso. La dimensione tipica del diametro interno può andare da una frazione a qualche μm . In queste condizioni, la radiazione che incide con un angolo sufficientemente piccolo sulle pareti interne del capillare, viene riflessa più volte fino ad essere trasferita all’altro capo del capillare. Questo tipo di “lenti” fu proposto da M.A. Kumakhov [1].

Ottiche a Policapillari.

Le Ottiche a Policapillari (O.P.) : analizziamo brevemente il loro principio di funzionamento. Dalla legge di Snell

$$n_1 \cdot \cos(\vartheta_1) = n_2 \cdot \cos(\vartheta_2)$$

abbiamo un legame tra gli angoli di incidenza e rifrazione di un fascio luminoso che incide sull’interfaccia di due mezzi 1 e 2 con indice di rifrazione n diverso. Osservando che nel caso dei raggi X tale indice è sempre minore di uno di una piccola quantità, per le pareti dei capillari possiamo scrivere

$$n_2 = 1 - \delta$$

e dato che il primo mezzo è il vuoto avremo $n_1 = 1$. Quando l’angolo ϑ_2 diviene nullo, la radiazione rifratta viaggia parallelamente all’interfaccia e quindi esiste un angolo minimo per avere un raggio rifratto, quando l’angolo di incidenza è più piccolo di tale angolo avviene la cosiddetta “riflessione totale”. Pertanto soltanto la radiazione che incide sulle pareti interne dei capillari con un angolo $\vartheta \leq \vartheta_{\text{critico}}$ può essere trasmessa all’uscita dell’O.P.

In base alla geometria, con cui è stata costruita l’O.P., la radiazione subirà una o più riflessioni prima di raggiungere l’uscita, inoltre da essa dipendono le proprietà di collimazione o focalizzazione della radiazione.

In fig.1 è mostrato lo schema di una semi-O.P. che può essere utilizzata, sia per collimare raggi X provenienti da una sorgente puntiforme che per focalizzare un fascio parallelo. Le O.P. “complete” sono in grado di focalizzare raggi X provenienti da una sorgente puntiforme.

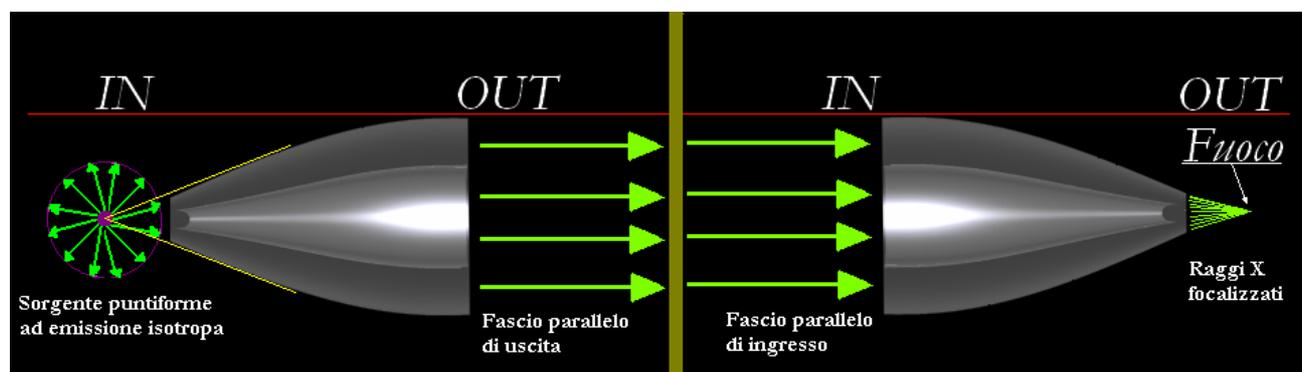


Figura 1. Semi-lente in due possibili configurazioni.

L'angolo utile d'incidenza (angolo d'accettanza) della radiazione X sulla superficie interna dei capillari è piccolo[2], come da eq.1

$$\vartheta \leq \vartheta_c \approx (1.17 / E_{keV}) \sqrt{\rho_{g/cm^3}} \approx 0.17^\circ \quad (\rho - \text{vetro} ; E = 10 \text{ keV}) \quad \text{Eq.1}$$

Pertanto occorre che l'asse ottico delle O.P. sia allineato entro un angolo $\ll 0.1^\circ$.

Procedura di allineamento.

In un tipico setup è utile impiegare un flusso continuo di raggi X a fascio parallelo oppure proveniente da una sorgente puntiforme, da inviare all'ingresso dell'O.P. ed un detector, es. scintillatore+PhotoMultiplier (P.M.) X, posto all'uscita [3]. Per ridurre l'angolo tra l'asse dell'O.P. e quello del fascio X considerato sono necessari due gradi di libertà rotazionali. Come mostrato in fig.2, effettuando delle rotazioni a intervalli $\ll 0.1^\circ$ lungo gli assi X ed Y (solidali all'O.P.), possiamo ridurre gli angoli a e b in modo da sovrapporre a tali assi quelli x' ed y'. Se, durante questa operazione, registriamo ad ogni passo l'intensità di radiazione trasmessa, avremo ottenuto la trasmissione al variare dei due angoli, ed una volta raggiunto il massimo l'O.P. sarà allineata.

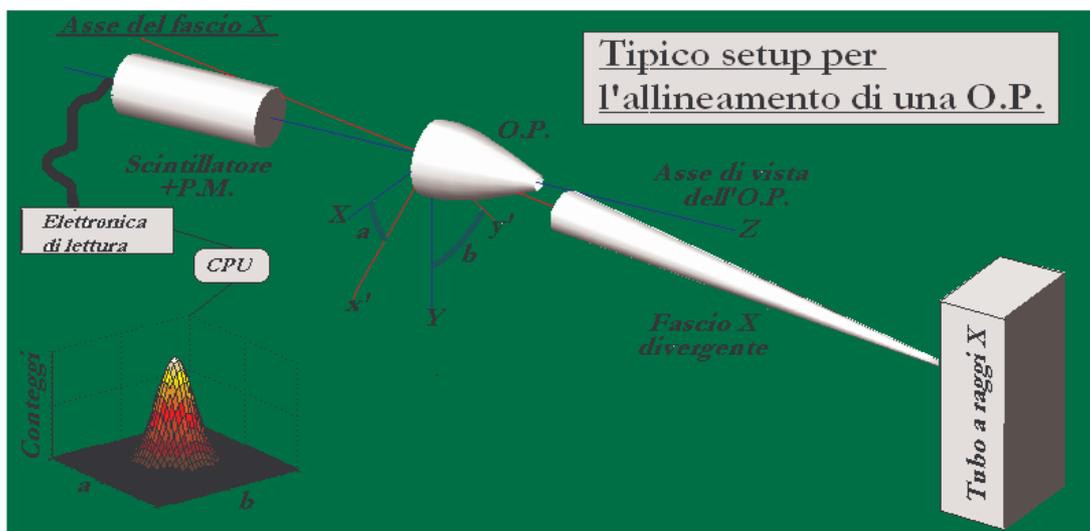


Figura2. Setup per l'allineamento di una O.P. tramite scintillatore+P.M. e tubo a raggi X convenzionale.

Sorgenti X da plasmi-laser.

Le sorgenti X da plasmi laser (PLX) sono ottenute focalizzando un impulso laser di alta potenza su un bersaglio (es. metallico). La dimensione della zona di emissione e la durata della sorgente X ottenuta sono, rispettivamente, dell'ordine di grandezza dello spot focale (tipicamente tra 10 e 100 μm) e della durata dell'impulso (dai nano ai femto secondi) [4]. In fig.3 vediamo un tipico setup utilizzato nei laboratori ILIL.

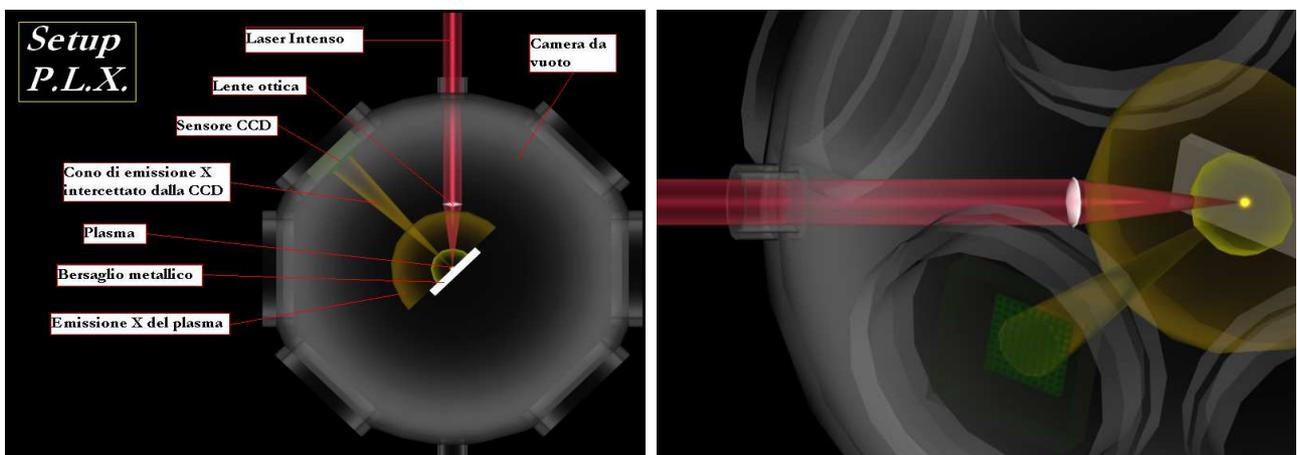


Figura 3. Setup PLX utilizzato nei laboratori ILIL.

Esperimento ideale.

In fig.4 mostriamo un possibile setup per le misure con le O.P. e le P.L.X.

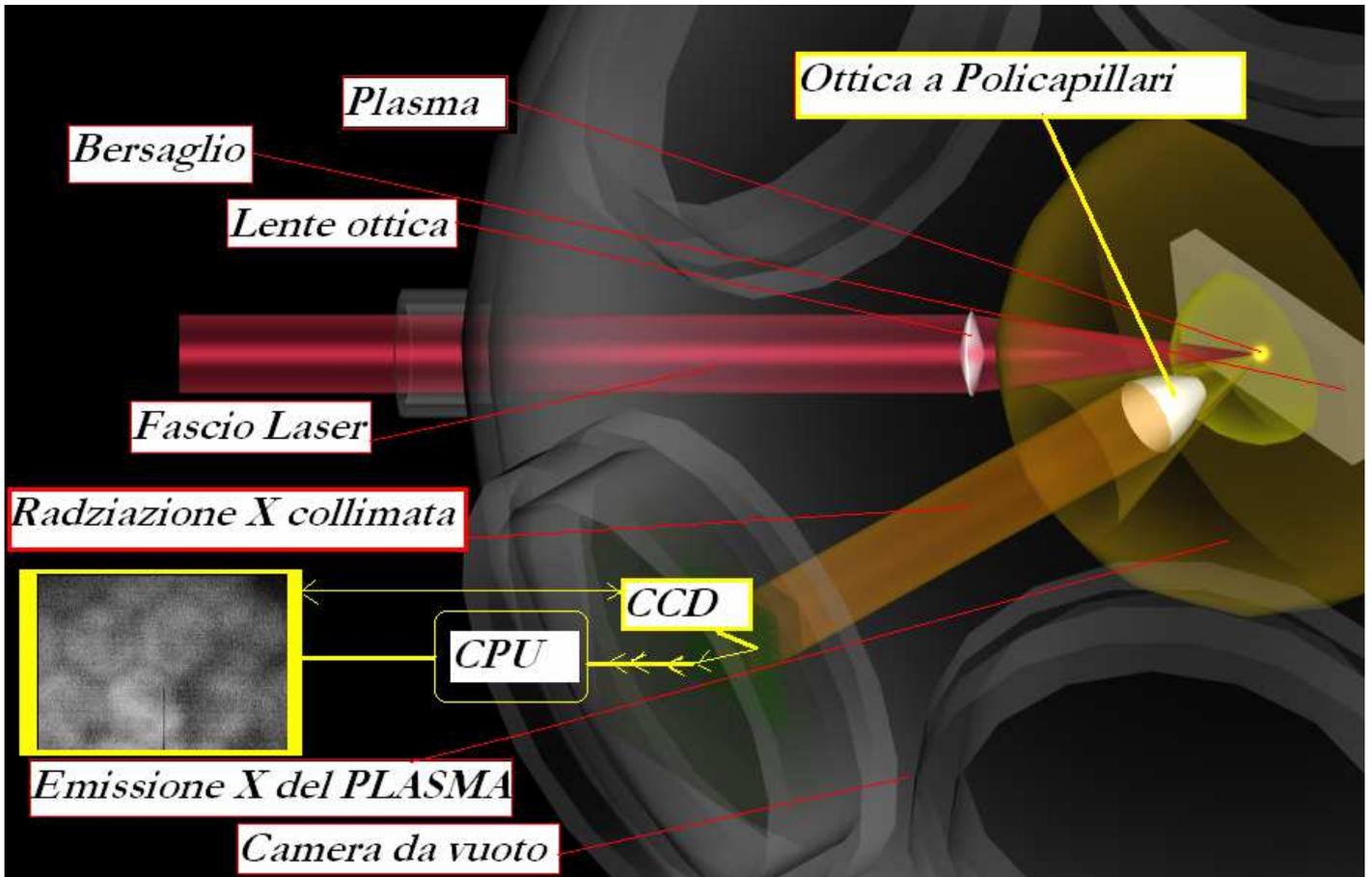


Figura 4. Schema setup finale: la radiazione X divergente emessa dal plasma viene, in parte, intercettata dall'IN dell'O.P. e trasmessa all'OUT dal quale fuoriesce sotto forma di fascio collimato.

Nello schema il fascio laser viene focalizzato sul bersaglio metallico, qui avviene la formazione del plasma che emette la radiazione X, perciò su tale punto deve puntare l'asse ottico dell'O.P. Dopo una corretta procedura di allineamento, l'asse dell'O.P., assieme con il punto di focalizzazione sul bersaglio, devono essere posti su uno stesso asse. La direzione di massima emissione X è generalmente perpendicolare alla superficie del bersaglio. Pertanto è preferibile che l'asse dell'O.P. sia in quella direzione e conseguentemente il fascio laser sarà focalizzato con un angolo opportuno rispetto alla superficie.

Problematiche sperimentali e possibili soluzioni: l'EG5.

Come già accennato, per allineare le O.P. occorre un flusso X continuo, mentre la sorgente PLX è impulsata, ciò complica l'allineamento delle Ottiche a Policapillari.

Una possibile soluzione è quella di sovrapporre, alla sorgente PLX, una sorgente X continua adatta all'allineamento, ad esempio focalizzando sullo spot del laser un fascio continuo di elettroni.

In fig. 5 mostriamo il setup di caratterizzazione della sorgente X a flusso continuo, ottenuta focalizzando un fascio di elettroni su un bersaglio metallico. Parte della radiazione emessa attraversa la finestra di Be e viene intercettata dalla CCD.

Per mettere a punto una procedura ad hoc abbiamo effettuato una serie di misure, utilizzando un cannone elettronico (Electron Gun 5keV = **EG5**) [5], puntato nella zona in cui viene normalmente ottenuta la PLX all'interno di una camera da vuoto ($5 \cdot 10^{-5}$ mbar) su bersagli di Ti, e Pb. Gli elettroni provenienti dall'EG5 hanno un'energia massima di 5keV, una distanza focale di circa 15cm e uno spot focale di circa 250 μ m che può essere posizionato all'interno di una zona di circa 3x3cm. Per ottenere informazioni sullo spettro della radiazione X generata, abbiamo utilizzato la tecnica a singolo fotone-singolo pixel [6,7] già collaudata nel nostro laboratorio, mediante CCD raffreddata (-5°C). Questa tecnica si basa sulla relazione di linearità tra l'energia del singolo fotone, assorbito per effetto fotoelettrico, e la carica accumulata nel pixel in cui è avvenuta l'interazione; perciò è essenziale, per poter risalire allo spettro, che tale tecnica sia utilizzata in condizioni di basso flusso di fotoni, in modo che la carica accumulata nel singolo pixel sia relativa ad un singolo fotone. In realtà tale tecnica è valida per valori non troppo alti dell'energia dei fotoni incidenti, minore di circa 25keV; ciò dipende dall'aumento delle dimensioni, con l'energia, della nuvola di carica generata dall'interazione. Quando tali dimensioni eccedono quelle di un pixel occorre considerare una generalizzazione di questa tecnica, la tecnica a singolo fotone multi-pixel, [7] ma poiché in questo contesto lavoriamo ad energie non superiori a 5keV tale tecnica non sarà considerata. A tale scopo è stata utilizzata una CCD (Full-Frame) in aria, schermata da una finestra di Be spessa circa 10 μ m e con un'apertura di circa 2cm. La radiazione è stata prelevata dall'interno della camera a vuoto utilizzando una seconda finestra di Be (15 μ m) dall'apertura di circa 2mm. Per allineare la prima finestra con il punto di focalizzazione degli elettroni abbiamo utilizzato il fascio di un laser He-Ne.

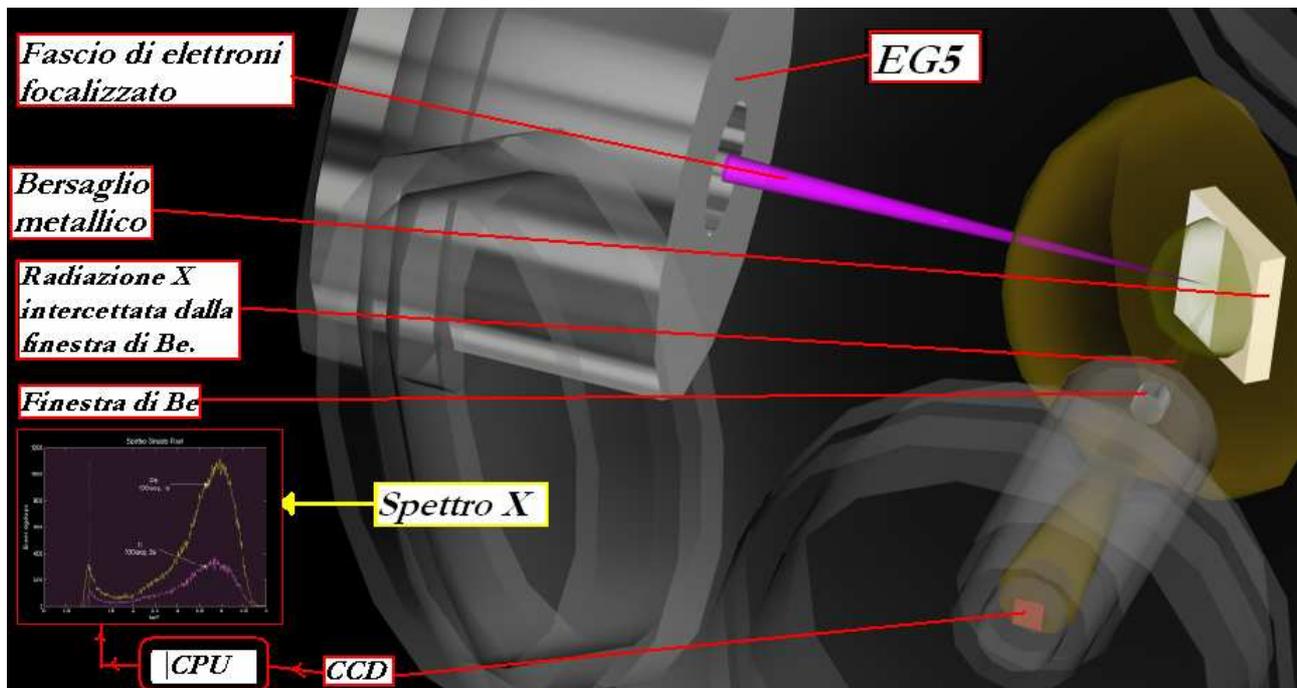


Figura 5. Setup di caratterizzazione della sorgente X a flusso continuo, ottenuta focalizzando un fascio di elettroni su un bersaglio metallico. Parte della radiazione emessa attraversa la finestra di Be e viene intercettata dalla CCD.

Spettri ottenuti bombardando Ti e Pb con l'EG5.

Sia nel caso del Ti che in quello del Pb abbiamo utilizzato la medesima procedura di allineamento e le stesse caratteristiche del fascio elettronico, ovvero 2.8A nel filamento incandescente dal quale vengono emessi gli elettroni per effetto termoionico e 5keV di campo accelerante. Lo spettro è stato ottenuto con la tecnica a singolo fotone la quale necessita della condizione di basso flusso, perciò per mantenerla abbiamo variato il tempo di esposizione da 3s (Ti) ad 1s (Pb), infatti l'intensità dei fotoni X emessi per Bremsstrahlung aumenta (circa) linearmente con il numero Z, [4]

$$I \propto iZV^2 \quad \text{Eq.2}$$

In fig.6, gli spettri ottenuti nei due casi, in cui i picchi centrati attorno 1keV sono dovuti al rumore [7] e stabiliscono un limite inferiore sull'applicabilità della tecnica a singolo fotone.

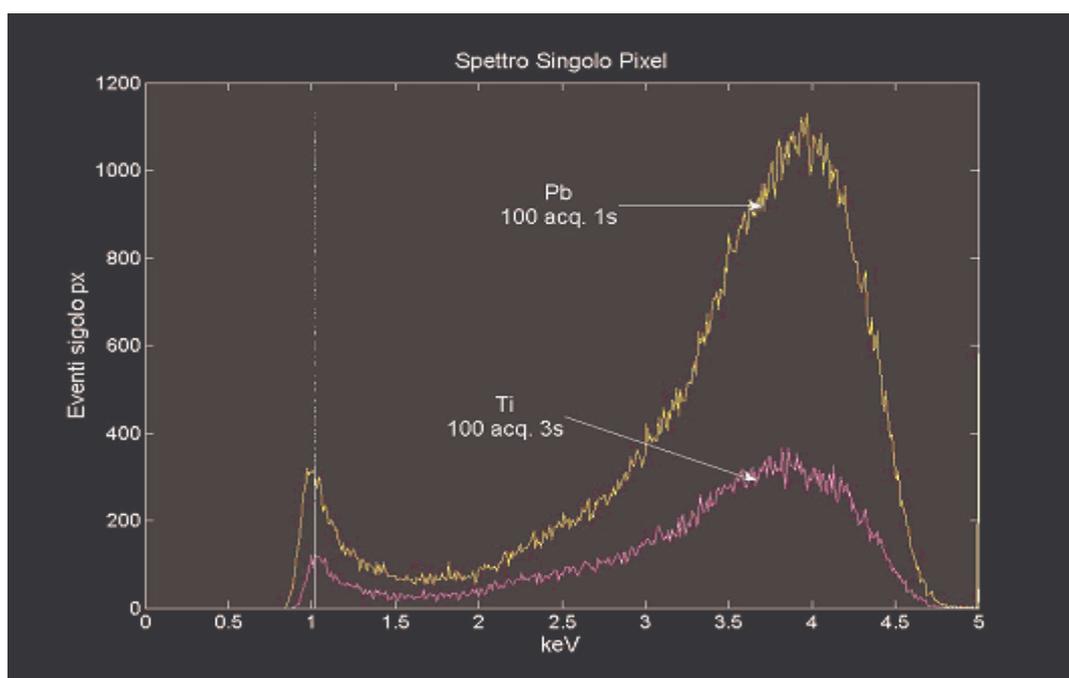


Figura6 . Spettri ottenuti bombardando bersagli di Ti e Pb con il fascio di elettroni dell'EG5, l'energia nominale degli elettroni è 5keV.

Nel caso del Ti ci si potrebbe aspettare l'emissione di riga K_alpha a 4.5keV, ma non si riesce a rilevare tale emissione. Infatti, essendo circa 4.96keV l'energia cui corrisponde la K-edge di assorbimento e quindi l'energia di legame dell'elettrone più interno, l'energia nominale degli elettroni nel fascio, 5keV, è appena sufficiente ad espellere l'elettrone della K-shell e l'emissione di riga dipende dall'esubero di energia.

In effetti, secondo l'eq.3, il numero di fotoni Kalpha emessi è [2]

$$N_k \propto (\omega_k / A)(E_0 / E_b - 1)^{1.67} \cong 10^{-6} \quad \text{Eq.3}$$

dove ω_k è il "fluorescence yield" (0.2 per la K_α del Ti), **A** è il peso atomico(47.88), **E₀** l'energia degli elettroni all'impatto (5keV), **E_b** l'energia della K-edge d'assorbimento (4.96keV), pertanto tale emissione è completamente coperta dal numero di fotoni del Bremsstrahlung che secondo l'eq.4 risulta essere

$$N_B \cong 10^{-6} \cdot Z \cdot V_{kV} \cong 10^{-4} \quad \text{Eq.4}$$

In fig.6 presentiamo gli spettri ottenuti bombardando bersagli di Ti e Pb con il fascio di elettroni dell'EG5, nel caso del Pb c'è un forte aumento del flusso: circa 4 volte maggiore (rapporto tra le aree), valore consistente con il rapporto tra i numeri atomici delle specie atomiche coinvolte.

CCD e fotoni “fuori zona”.

Si può notare nella parte bassa della fig.7(sinistra), relativa ad un’acquisizione da 30s, che parte dei fotoni arrivano sulla CCD in una zona che è esterna alla proiezione circolare della finestra di Be.

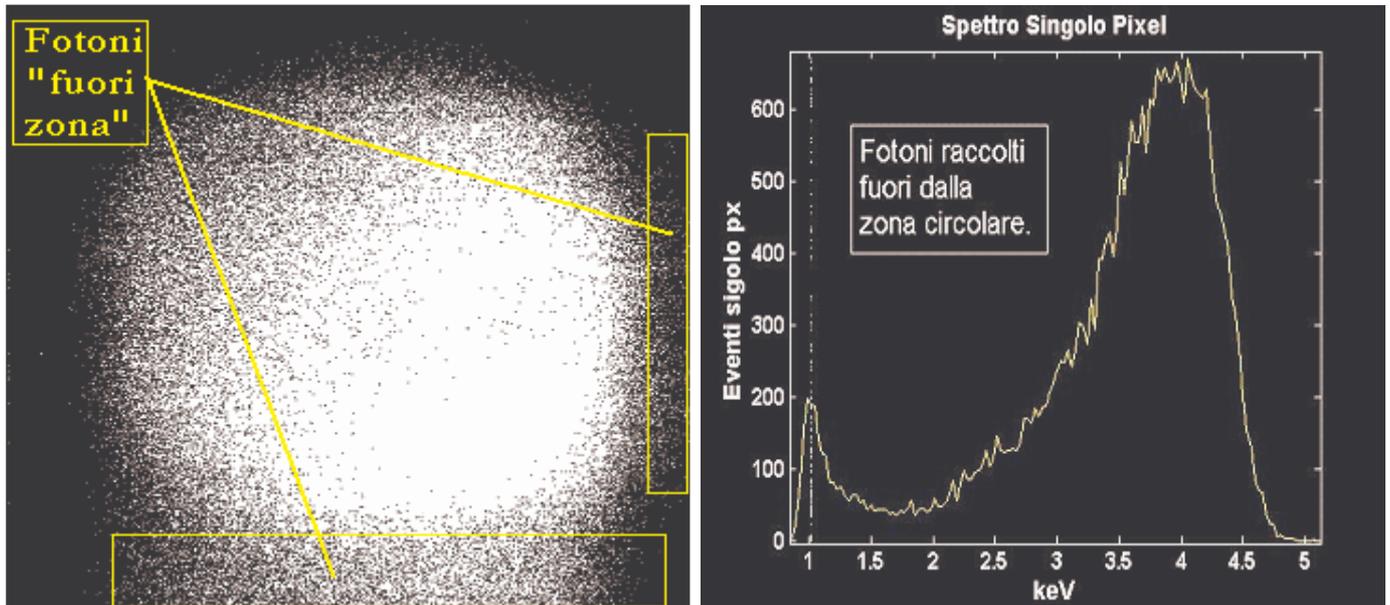


Figura 7. A sinistra: tipica acquisizione CCD, integrata su 30s, del fascio X; nella zone esterne sono indicati i fotoni “fuori zona”. **A destra:** spettro ottenuto per i soli fotoni “fuori zona”, ovvero fuori della proiezione circolare della finestra di Be.

I fotoni raccolti in tale zona, per questioni geometriche, non possono provenire direttamente dalla sorgente. Con una verifica, che è consistita nel ruotare la CCD, si scopre che tali fotoni sono “fuori zona” perché assorbiti durante la fase di lettura della CCD e pertanto vengono registrati in una zona differente da quella in cui è avvenuto l’assorbimento. Perciò possiamo considerare questi fotoni “fasulli” per quanto riguarda la loro posizione, ma possiamo ancora utilizzarli per scopi spettroscopici in quanto hanno conservato l’informazione sulla loro energia. In effetti, analizzando lo spettro di tali fotoni in fig.7(destra), è evidente che hanno le caratteristiche spettrali di tutti gli altri.

Possibile nuova tecnica di allineamento delle Ottiche a Policapillari utilizzando un laser He-Ne ed una CCD.

Come accennato in precedenza, esistono delle tecniche di allineamento consolidate per le O.P. [3], ma queste non si adattano bene alle nostre specifiche condizioni sperimentali.

Pertanto abbiamo pensato di effettuare l’allineamento di una O.P., utilizzando una tecnica, basata sull’uso di una CCD e di un laser He-Ne, adatta alle specifiche condizioni sperimentali in cui operiamo.

L’allineamento, in questo caso, consiste nel far coincidere, a meno di 0.1° , l’asse dell’O.P. (individuato dal centro dell’IN e dell’OUT) con l’asse formato dal punto sorgente ed il centro della finestra di Be utilizzata per trasferire parte della radiazione fuori dalla camera a vuoto.

Abbiamo ottenuto un primo risultato utilizzando il fascio laser He-Ne usato per allineare il punto sorgente con la finestra di Be. Infatti posizionando l’O.P. in modo che i centri delle superfici d’ingresso e d’uscita coincidessero con lo spot He-Ne, entro il decimo di millimetro (al più 0.15mm) e considerata una O.P. di circa 10cm di lunghezza, otteniamo un allineamento di circa mezzo grado. Inoltre rimaneva ancora a disposizione la possibilità di “spostare” il punto d’impatto degli elettroni nel raggio di 1-2 cm. Questa libertà, in effetti ci offre la possibilità di ridurre ulteriormente e manualmente la divergenza tra l’asse sorgenteX-finestra di Be e l’asse dell’O.P.,

quindi di effettuare una correzione più fine al primo allineamento per raggiungere il decimo di grado richiesto. Poiché la CCD Full-frame utilizzata, utilissima per gli scopi spettroscopici, ha un tempo minimo di lettura dell'ordine del secondo ci è sembrato più opportuno utilizzare una CCD interline (fino a 25 frame/s) per l'allineamento, così da poter ottimizzare il flusso in uscita in tempo reale. Un altro importante fattore è la distanza focale della lente:

per avere la massima trasmissione di radiazione, è importante che l'angolo con cui tale radiazione arriva sulla lente sia minore dell'angolo di accettazione della stessa, tale angolo è fissato dal tipo e dalla geometria della lente. In pratica, come per le lenti ottiche, in prima approssimazione è sufficiente che il fuoco geometrico della lente coincida con la sorgente puntiforme.

In fig.8 mostriamo i passi più importanti dell'allineamento. Dopo aver effettuato il primo allineamento (fig.8 b), l'O.P. trasmetteva una piccola quantità di radiazione. Ciò ha permesso l'allineamento più fine (fig.8 c) ottenuto spostando il punto-sorgente attraverso appositi comandi manuali ed un monitoraggio in tempo reale. In effetti al termine della procedura l'O.P. ha raggiunto un discreto grado di allineamento.

a) Fondo CCD

b) Allineamento $\approx 0.5^\circ$

c) Allineamento $< 0.1^\circ$

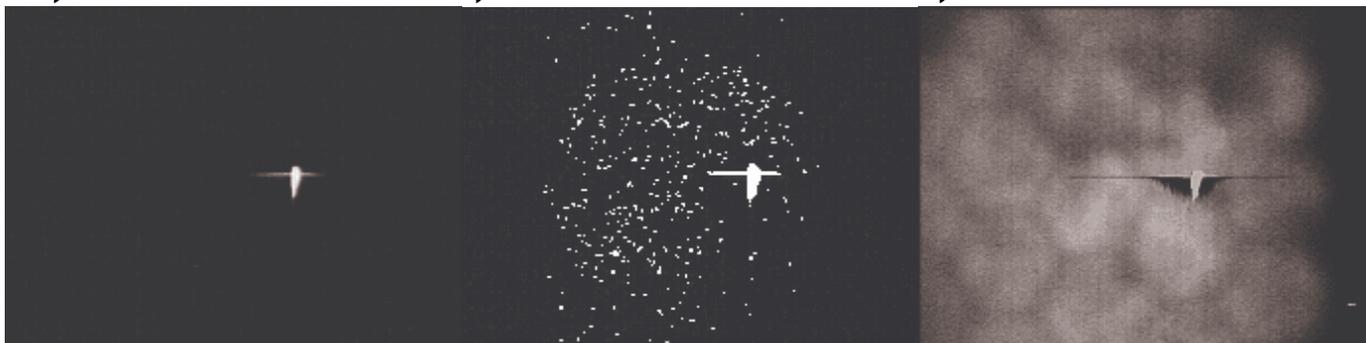


Figura 8. Da sinistra a destra: il fondo del sensore, la radiazione trasmessa dopo il primo grado di allineamento ed infine la radiazione trasmessa dopo l'allineamento più fine.

Osservando la fig.8 a) ottenuta dalla CCD in assenza di segnale, notiamo una macchia bianca che è semplicemente un danno presente sul sensore utilizzato, nella fig. b) è riportata la radiazione trasmessa in 1/25s dopo l'allineamento "al primo ordine", mentre nella fig. c) abbiamo riportato un'acquisizione integrata su 1s dopo l'allineamento fine. In quest'ultima acquisizione è chiaramente visibile la struttura ad esagoni tipica delle O.P., sono inoltre presenti alcune zone più chiare che corrispondono a disuniformità dell'O.P. Ricordiamo che tali lenti sono molto sensibili a danneggiamenti o impurità sulle due superfici di IN ed OUT.

Conclusioni

Dobbiamo far notare che in realtà la procedura effettuata non può essere considerata, se non nella prima parte "il primo ordine", a tutti gli effetti come un allineamento dell'O.P. In effetti, considerata la nostra strumentazione, ed avendo utilizzato lo spostamento del punto sorgente per l'allineamento fine ad O.P. fissa, dovremmo parlare di allineamento della sorgente X sull'O.P. e non viceversa.

Tuttavia, altre misure effettuate nei Laboratori Nazionali di Frascati sono state utili per verificare ed infine dimostrare che la stessa procedura, ma con diversa strumentazione, può essere applicata per effettuare un "reale" allineamento dell'O.P. sulla sorgente X fissa. Questa differenza diviene cruciale nel progettare un setup che coinvolge contemporaneamente una O.P. ed una P.L.X., infatti quest'ultima rimane fissata dall'allineamento del laser sul bersaglio e l'unico modo per mettere insieme il tutto è allineare l'O.P. sulla sorgente P.L.X.

Bibliografia:

- [1] Kumakhov M.A., Nucl. Instrum. Methods B, 48 (1990) 283.
- [2] R.Cesareo, La rivista del Nuovo Cimento, vol. 23 ,serie 4, num. 7 (2000), pag.65.
- [3] G.Cappuccio, Capillary optics as an x-ray condensing lens: An alignment procedure, [http://www.lnf.infn.it/esperimenti/sr_dafne_light/polyx/lnf-00-003\(p\).pdf](http://www.lnf.infn.it/esperimenti/sr_dafne_light/polyx/lnf-00-003(p).pdf)
- [4] D.Giulietti and L.A.Gizzi, *X-ray emission from laser-produced plasmas*, La Rivista del Nuovo Cimento **21**, 1 (1998).
- [5] Scarinci F, Casella A, Lagomarsino S. et al., Applied Surface Science 102, 38-41 Aug. 1996.
- [6] Labate, M. Galimberti, A. Giulietti, D. Giulietti, L.A. Gizzi, P. Tomassini, G. Di Cocco, *A laser-plasma source for CCD calibration in the soft X-ray range*, Nucl. Instr. and Meth. A. 495, 148 (2002).
- [7] T.Levato , *Spettroscopia X a singolo fotone: analisi multi-pixel e filtri di attenuazione*, Tesi di laurea spec. (2004). <http://ilil.ipcf.cnr.it/group/Theses/tesiTL.pdf>